

УДК 69.01

Е.А. Петрова, О.А. Калмыков

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков

К ОЦЕНКЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ТРЕХСЛОЙНЫХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ

В статье рассмотрен экспериментально-теоретический подход к определению критических нагрузок по четырем типам предельных состояний трехслойных сэндвич-панелей. Приведены алгоритмы определения критических сил исчерпания несущей способности сэндвич-панели при равномерно распределенной и сосредоточенной нагрузках. Дана постановка и подход к решению задачи рационализации параметров сэндвич-панелей.

Ключевые слова: сэндвич-панель, предельное состояние, складкообразование, потеря устойчивости, упругое основание, коэффициент постели.

1. Анализ существующей нормативной базы и постановка задачи исследования

Современная ситуация на строительном рынке подтверждает действительную популярность распространенных в настоящий момент ограждающих конструкций в виде трехслойных сэндвич-панелей высокой заводской готовности. Сэндвич-панель, состоящая из внешних металлических обшивок и изоляционного слоя на основе минеральной ваты или пенополистирола, представляет собой конструкцию, которая обладает малым весом, высокими теплозвукоизоляционными характеристиками, долговечностью, экономичностью, позволяя тем самым быстро и с минимумом трудозатрат возводить здания различного назначения. Тем не менее, несмотря на интенсивное развитие отечественного рынка сэндвич-панелей, в Украине практически отсутствует нормативная база по расчету и проектированию сэндвич-панелей как обособленных строительных конструкций. Имеющаяся нормативная документация лишь регламентирует требования к тем или иным теплоизоляционным материалам, используемым при производстве сэндвич-панелей, и их характеристикам. Главными нормативными документами в данной отрасли являются ДБН В. 2.6-31-2006 «Тепловая изоляция зданий», ДБН В.2.6 - 33:2008 «Конструкции зданий и сооружений. Конструкции внешних стен с фасадной теплоизоляцией. Требования к проектированию, устройству и эксплуатации» и некоторые ДСТУ на их базе. Определенную ценность представляют технические условия производителей сэндвич-панелей, однако, данные нормативы имеют ограниченную сферу действия, поскольку предназначены исключительно для внутреннего пользования.

В то же время, в Европейском Союзе необходимые нормы существуют уже более 20 лет. Предварительные европейские рекомендации по проектированию и тестированию сэндвич-панелей были опубликованы Европейской конвенцией о Стальных Конструкциях (European Convention for Constructional Steelwork (ECCS)) еще в 1991 году. В них содержится детальное описание конструктивных решений сэндвич-панелей, методов проектирования и расчета, требования к огневому, акустическому, прочностному и другим испытаниям. Кроме того, данный норматив [1] регламентирует также четыре типа предельных состояний, в результате наступления одного из которых или их комбинации может произойти исчерпание несущей способности панели. В Предварительных рекомендациях также приводится методика определения соответствующих предельным состояниям критических нагрузок, однако, существенным пробелом европейских норм, с нашей точки зрения, является отсутствие методики определения рациональных параметров сэндвич-панелей, которые влияют на достижение каждого из предельных состояний.

В связи с вышеизложенным, практическую ценность представляет задача рационализации конструкции панели, которая заключается в выравнивании критических нагрузок по всем четырем типам предельных состояний:

- по предельному прогибу - P_I ;
- по складкообразованию сжатой обшивки - P_{II} ;
- по сопротивлению сдвигу утеплителя - P_{III} ;
- по сопротивлению панели сжатию на опоре - P_{IV} .

Так, в духе работ профессора А.Р. Ржаницина, рациональной конструкцией сэндвич-панели будем полагать такую конструкцию, для которой критические нагрузки по каждому из предельных состояний совпадут, либо разница между ними достигнет нижней грани [2]:

$$\begin{aligned} P_I - P_{II} &\rightarrow \inf \\ P_I - P_{III} &\rightarrow \inf \\ P_I - P_{IV} &\rightarrow \inf \\ P_{II} - P_{III} &\rightarrow \inf \\ P_{II} - P_{IV} &\rightarrow \inf \\ P_{III} - P_{IV} &\rightarrow \inf \end{aligned} \quad (1)$$

В связи с этим, вводится вектор управляющих параметров:

$$\{X\}^T = \{h; \delta; (EI)_{red}; C_2\}. \quad (2)$$

где h – высота панели; δ – толщина металлической обшивки; $(EI)_{red}$ – приведенная жесткость панели; C_2 – парциальный коэффициент постели, предопределенный обжатием среднего слоя панели (утеплителем).

Для решения комплексной задачи рационализации необходимо решить ряд вспомогательных задач используя предлагаемый экспериментально-теоретический подход. В качестве объекта рационализации рассматриваются трехслойные сэндвич-панели серии «Алютерм» [3], производимые предприятием ООО «НТК» в Харьковской области.

2. Критическая сила складкообразования обшивки сэндвич-панели при равномерно-распределенной нагрузке

Для приближенной (инженерной) оценки критической силы потери устойчивости сжатой от изгиба обшивки предлагается следующий алгоритм. Рассматривается шарнирно опертая трехслойная сэндвич-панель, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой (рис. 1).

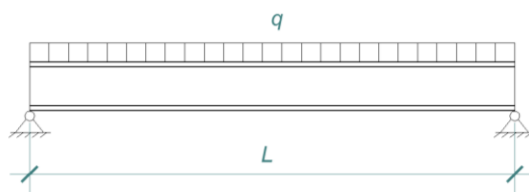


Рис. 1. Трехслойная панель, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой

Данная нагрузка установлена экспериментальным путем, причем ее величина соответствует максимально допустимому (нормативному) прогибу панели [4]. Пусть этот прогиб равен:

$$f_{adm} = \frac{L}{200}, \quad (3)$$

где L – пролет панели.

В качестве расчетной модели обшивки принимается система в виде конструкции, лежащей на упругом основании (рис. 2). Здесь следует отметить две особенности, являющиеся фактически рабочими гипотезами:

- тонкая обшивка условно представляется балкой;
- коэффициент постели основания должен отражать специфику деформирования конструктива.

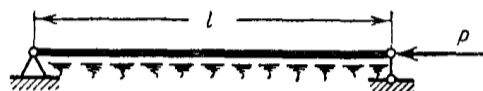


Рис. 2. Балка на упругом основании

Первая гипотеза обосновывается отсутствием деформирования рассматриваемого элемента в плоскости, перпендикулярной продольной оси листа обшивки (установлено экспериментально [5]). В свою очередь, для определения коэффициента основания предлагается следующий приближенный прием. В его основе лежит предположение о линейности деформирования, допускающее следующее представление:

$$C = C_1 + C_2 \cdot b, \quad (4)$$

где C – интегральный коэффициент постели; C_1 – парциальный коэффициент постели, предопределенный максимальным прогибом панели $[кН/м^2]$; C_2 – парциальный коэффициент постели, предопределенный обжатием среднего слоя панели (утеплителем) $[кН/м^3]$; b – ширина панели $[м]$.

Пусть максимальный прогиб панели задан выражением:

$$f_{max} = \frac{\alpha \bar{q} L^4}{(EI)_{red}}, \quad (5)$$

где α – известный коэффициент; $(EI)_{red}$ – условная жесткость панели; $\bar{q} = q \cdot b$, q – распределенная по площади нагрузка.

Тогда из (3) и (1) можно определить условную жесткость панели

$$(EI)_{red} = 200 \cdot \alpha \cdot q \cdot b \cdot L^3, \quad (6)$$

Имея ввиду, что основание представлено постелью Винклера, для C_1 получим:

$$C_1 = \frac{200qb}{L}. \quad (7)$$

Коэффициент C_2 определяем в лаборатории экспериментально, путем вдавливания штампа с известными размерами в образец из утеплителя на единичную глубину (рис. 3).

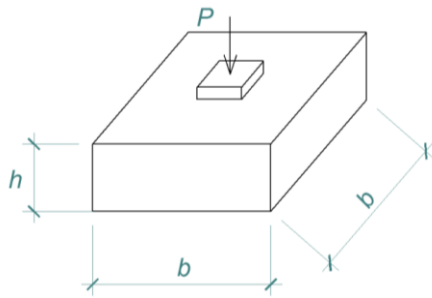


Рис. 3. К определению коэффициента постели C_2 (h и b – соответственно высота и ширина образца утеплителя, P – прикладываемое к штампу усилие)

Окончательно коэффициент постели примет вид:

$$C = b \left(\frac{200q}{L} + C_2 \right). \quad (8)$$

Так как обшивка выполнена из стального листа, с учетом первой введенной гипотезы, можно заменить выражение для ее жесткости выражением:

$$(E_s I)_{sh} = E_s \cdot \frac{b \delta^3}{12}, \quad (9)$$

где E_s – модуль упругости стали, δ – толщина обшивки.

Располагая выражениями (8) и (9) запишем дифференциальное уравнение изгиба балки, лежащей на упругом основании [6]:

$$\frac{d^4 v}{dx^4} + k^2 \frac{d^2 v}{dx^2} + r v = 0 \quad (10)$$

где v – прогиб; $k^2 = \frac{P}{(E_s I)_{sh}}$; $r = \frac{C}{(E_s I)_{sh}}$.

Краевые условия задачи имеют вид:

$$\text{при } X = 0; v = 0; \frac{d^2 v}{dx^2} = 0;$$

$$\text{при } X = L; v = 0; \frac{d^2 v}{dx^2} = 0.$$

Следуя решению, приведенному в [6], запишем характеристическое уравнение, соответствующее (10):

$$p^4 + k^2 p^2 + r = 0 \quad (11)$$

Введем далее обозначение:

$$\bar{r} = r \cdot \left(\frac{L}{\pi} \right)^4 \quad (12)$$

Или с учетом (8) и (9)

$$\bar{r} = \frac{2400}{\pi^4} \cdot \left(\frac{q}{E_s} \right) \cdot \left(\frac{L}{\delta} \right)^3 \cdot \left(1 + \frac{C_2 \cdot L}{200q} \right) \quad (13)$$

Корни (11) будут

$$p^2 = -\frac{k^2}{2} \pm \sqrt{\frac{k^4}{4} - r} \quad (14)$$

Примем $p = \pm im$, где

$$m_1 = -m_3 = \sqrt{\frac{k^2}{2} + \sqrt{\frac{k^4}{4} - r}} \quad (15.1)$$

$$m_2 = -m_4 = \sqrt{\frac{k^2}{2} - \sqrt{\frac{k^4}{4} - r}} \quad (15.2)$$

Решение уравнения (10) получает форму

$$v = A \cdot \sin m_1 x + B \cdot \sin m_2 x + C \cdot \cos m_1 x + D \cdot \cos m_2 x \quad (16)$$

Исходя из граничных условий, получим следующее уравнение

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -m_1^2 & -m_2^2 \\ \sin m_1 L & \sin m_2 L & \cos m_1 L & \cos m_2 L \\ m_1^2 \sin m_1 L & m_2^2 \sin m_2 L & m_1^2 \cos m_1 L & m_2^2 \cos m_2 L \end{vmatrix} = 0$$

Или

$$(m_1^2 - m_2^2)(m_2^2 - m_1^2) \sin m_1 L \cdot \sin m_2 L = 0 \quad (17)$$

Приравняв нулю $\sin m_1 L$ и $\sin m_2 L$, получим:

$$m_i L = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (18)$$

Определяя k^2 по (16) и пользуясь (18), находим:

$$k^2 = \frac{p}{EI} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} + \frac{r L^2}{n^2 \pi^2} \quad (19)$$

Изогнутая линия состоит из n полуволен синусоиды

$$v = A \sin \frac{n\pi}{L} x \quad (20)$$

В отличие от свободно прогибающегося стержня здесь число полуволен $n \neq 1$, оно должно быть определено из условия минимума нагрузки. На рис. 4 по оси абсцисс отложены значения $\bar{r} = r \left(\frac{L}{\pi} \right)^4$, а по оси ординат – отношение P/P_3 , где P_3 – эйлерова сила для стержня, не имеющего упругого основания. Принимая $n = 1, 2, 3, \dots$, получим серию прямых; участки этих прямых, показанные жирной линией, являются расчетными. Переход от n -й ветви к $(n+1)$ -й соответствует величине r , определяемой из равенства

$$\frac{n^2 \pi^2}{L^2} + \frac{r L^2}{n^2 \pi^2} = \frac{(n+1)^2 \pi^2}{L^2} + \frac{r L^2}{(n+1)^2 \pi^2} \quad (21)$$

Отсюда

$$r = n^2(n+1)^2 \frac{\pi^4}{L^4}. \quad (22)$$

Соответствующие значения k будут

$$k^2 = \frac{\pi^2}{L^2} [n^2 + (n+1)^2]. \quad (23)$$

Если число полувольт n достаточно велико, то можно записать условие минимума k^2 , приравнявая нулю производную от k^2 по $n\pi/l$:

$$\frac{d(k^2)}{d(\frac{n\pi}{L})} \equiv 2\frac{n\pi}{L} - 2\frac{rL^3}{n^3\pi^3} = 0. \quad (24)$$

При этом

$$\frac{n\pi}{l} = \sqrt[4]{r}. \quad (25)$$

Критическая нагрузка по (20) оказывается равной

$$P_{II} = 2EI\sqrt{r} = 2\sqrt{EIc}. \quad (26)$$

В безразмерных величинах

$$\frac{P_{II}}{P_3} = 2\sqrt{r}. \quad (27)$$

Формуле (27) отвечает предельная линия, показанная на рис. 4 пунктиром. Считая в (17) $(m_1^2 - m_2^2) = 0$, приходим к соотношению $k^4 = 4r$, и, далее, к прежней формуле (27).

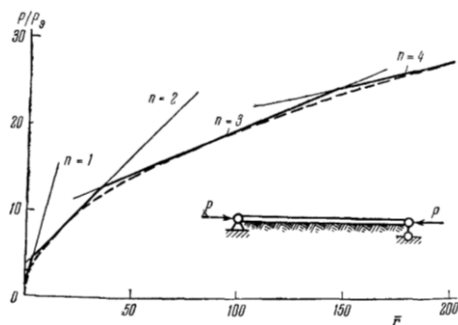


Рис. 4. К определению числа полувольт

При определении критической силы потери устойчивости сжатой обшивки, следует помнить, что критические напряжения в обшивке не могут превышать предел пропорциональности материала обшивки:

$$\sigma_{кр} < \sigma_{пл}. \quad (28)$$

3. Решение задачи потери устойчивости обшивки сэндвич-панели при действии сосредоточенной силы

Дальнейшее определение критических сил для предельных состояний будем рассматривать на основе методики, приведенной в ГОСТ 23486-79 «Панели металлические трехслойные стеновые с утеплителем из пенополиуретана». В соответствии с [7], рассматривается образец панели «Алютерм» размером 250x1100 мм, вырезанный из серийной

панели, который испытывается на поперечный изгиб. Испытание проводят сосредоточенной нагрузкой в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5.

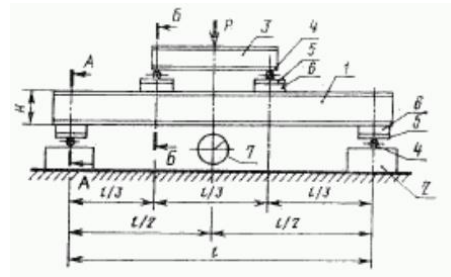


Рис. 5. Схема испытания образца сндвич-панели на поперечный изгиб

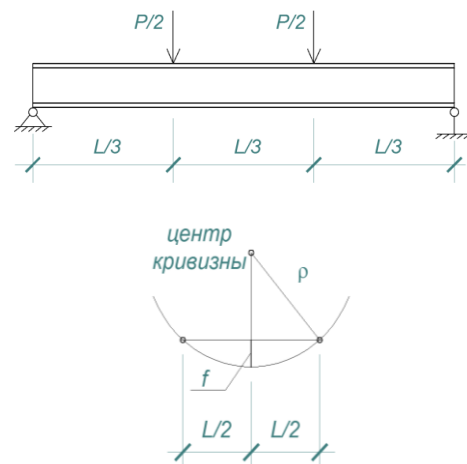


Рис. 6. Расчетная схема испытания панели на поперечный изгиб

В силу малости прогиба, деформированная упругая ось аппроксимируется окружностью. Располагая расчетной схемой (рис. 6), запишем:

$$\rho^2 = \frac{L^2}{4} + (\rho - f_{max}) \quad (29)$$

$$\rho = L \cdot \frac{4\gamma^2 + 1}{8\gamma}, \quad (30)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{(EI)_{\text{reg}}} \quad (31)$$

где $\gamma = \frac{f_{\max}}{L}$, f_{\max} – максимальный прогиб ($\frac{1}{200}$ по [8]), L – длина образца.

Для данной расчетной схемы:

$$M = \frac{PL}{6} \quad (31)$$

Тогда приведенную жесткость панели можно записать:

$$(EI)_{red} = \alpha P l^2 \cdot \frac{4\gamma^2 + 1}{\gamma} \quad (32)$$

где α – известный коэффициент, для схемы, приведенной на рис. 6 составляет $\alpha = \frac{1}{48}$.

Коэффициент постели основания для панели, нагруженной сосредоточенной силой, определяется по описанной ранее формуле (4). Из условия максимального прогиба панели парциальный коэффициент постели C_1 можно обозначить:

$$C_1 = \frac{EI}{\alpha l^3 b} = \frac{P}{l \cdot b} \cdot \frac{4\gamma^2 + 1}{\gamma}. \quad (33)$$

Тогда, интегральный коэффициент постели C примет вид:

$$C = \frac{P}{l \cdot b} \cdot \frac{4\gamma^2 + 1}{\gamma} + C_2 \cdot b. \quad (34)$$

Для балки на упругом основании, нагруженной сосредоточенной силой, выражение (14) можно записать в виде:

$$\bar{r} = \frac{C}{(EI)_n} \cdot \left(\frac{l}{\pi}\right)^4 = \left(\frac{P}{l \cdot b} \cdot \frac{4\gamma^2 + 1}{\gamma} + C_2 \cdot b\right) \cdot \frac{l^4 \cdot 12}{\pi^4 \cdot E_n \cdot b \cdot \delta^3} \quad (35)$$

Эйлера сила для обшивок панели определяется по формуле:

$$P_3 = \frac{\pi^2 \cdot E_{обш} \cdot b \cdot \delta^3}{12 \cdot l^2} \quad (36)$$

Для определения критической силы из условия максимального прогиба введем гипотезу о том, что приведенная жесткость панели меньше жесткости металлических обшивок. Для оценки жесткости панели в целом следует воспользоваться поправочным коэффициентом k :

$$k = \frac{(EI)_{ред}}{(E_s l)_{sh}}, \quad (37)$$

где $(EI)_{ред}$ – приведенная жесткость панели, $(E_s l)_{sh}$ – жесткость металлических обшивок.

Исходя из (27), Эйлера силу для панели определим по формуле:

$$P_3 = \frac{f_{max} \cdot \alpha \cdot k \cdot EI}{l^3}, \quad (38)$$

где $f_{max} = \frac{l}{200}$ – максимальный прогиб образца панели длиной 110 см; k – поправочный коэффициент для оценки жесткости панели; l – длина образца, вырезанного из панели.

Тогда, для определения критической силы потери устойчивости металлической обшивки панели (складкообразования) под действием сосредоточенной нагрузки для образца в соответствии со схемой, приведенной в [6], из (34) получим значения \bar{r} , а значение $P_{кр}$ определим из:

$$\frac{P_{II}}{P_3} = n^2 + \frac{r}{n^2} \quad (39)$$

Получаемые критические напряжения также следует проверить на соответствие неравенству (28).

4. Определение критических сил для сэндвич-панелей по обжатию и сдвигу утеплителя, а также по критерию предельного прогиба

Решение задачи поиска критической силы для предельного состояния обжатия утеплителя на опоре сводится к решению, приведенному в [1]. Принимая гипотезы, обозначенные ранее, а также допущение о равномерном распределении опорной реакции вдоль прогона, неравномерность в духе [2] может быть учтена коэффициентом $\varphi \in (0,1)$. Тогда:

$$P_{IV} = \varphi \frac{Q}{ab} \quad (40)$$

$$P = 2Q; \quad Q \leq \frac{[\sigma_{ск}]ab}{2\varphi}$$

Q – реакция на опоре, a – ширина прогона, $[\sigma_{ск}]$ – предел прочности утеплителя на сжатие, $[\sigma_{ск}] = 0,1 \text{ МПа}$ [1].

Критическую силу сдвига утеплителя допустимо определить по формуле Д.И. Журавского:

$$\tau = \frac{QS}{bl}, \quad (41)$$

где τ – касательные напряжения в утеплителе, Q – максимальная поперечная сила, I – момент инерции сечения утеплителя, S – статический момент сечения утеплителя, b – ширина образца, $[\sigma_{ср}] = 0,05 \text{ МПа}$ [1].

Тогда, для определения критической силы в соответствии со схемой, приведенной на рис.6, выражение (40) примет вид:

$$P_{III} = 2Q = 2 \frac{\tau bl}{S} = \frac{4\tau_{кр} b l}{S} \quad (42)$$

В свою очередь, для определения критической силы из условия максимального прогиба применим гипотезу, приведенную ранее, а именно, что средняя величина жесткости панели меньше жесткости обшивок панели, что учитывается поправочным коэффициентом k . Тогда, определим критическую силу по формуле:

$$P_I = \frac{f_{max} \cdot \alpha \cdot k \cdot EI}{l^3}, \quad (43)$$

где $f_{max} = \frac{l}{200}$ – максимальный прогиб образца панели, k – поправочный коэффициент для оценки жесткости панели; l – длина образца, вырезанного из панели, $(EI)_{ред}$ – приведенная жесткость панели.

Заключение

Определение критических нагрузок для четырех предельных состояний трехслойных сэндвич-панелей в соответствии с приведенным экспериментально-теоретическим подходом для

разных толщин панелей серии «Алютерм» приведено на рис. 8-11.

Исходные данные для расчета приняты следующими: $E_1 = 3,1 \text{ МПа}$ - модуль упругости утеплителя, $E_2 = 2,1 \cdot 10^6 \text{ МПа}$ - модуль упругости материала обшивок, $l = 110 \text{ см}$ - длина панели, $b = 25 \text{ см}$ - ширина панели.

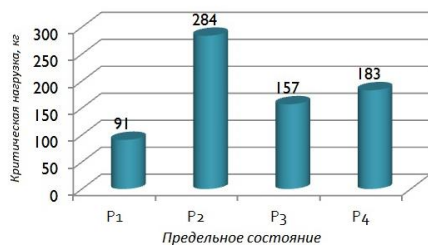


Рис. 8. Панель толщиной 80 мм

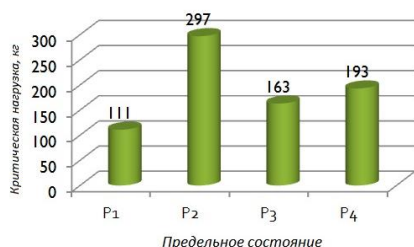


Рис. 9. Панель толщиной 100 мм

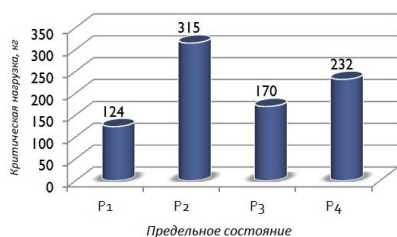


Рис. 10. Панель толщиной 120 мм

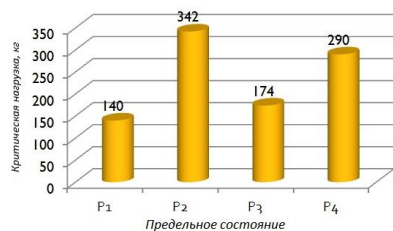


Рис. 11. Панель толщиной 150 мм

Анализ приведенных графиков (рис. 8-10) и оценка влияния каждого из управляющих параметров на указанные предельные состояния, позволяет сделать вывод о том, что критические нагрузки для разных типов предельных состояний отличаются существенно. Разброс нагрузок в некоторых случаях может составлять порядка 300% (как для случая сравнения нагрузок для предельного состояния предельного прогиба и складкообразования), что является нерациональным

с точки зрения реального проектирования. В связи с чем, целесообразным считается расширение пространства параметров в управляющем векторе (2) путем введения в конструкцию панели конструктивных изменений с целью максимального выравнивания критических нагрузок по всем четырем типам предельных состояний.

Литература

1. *European Recommendations for Sandwich Panels (CIB 2000). Part 1: Design.* Rotterdam, 2000. – 168p.
2. Ржаницин А.Р. Составные стержни и пластины. – Москва, Стройиздат:1986. – 136 с.
3. ТУ В.2.6-28.1-32564237-001:2007. Панели металлический трехслойные серии «Алютерм». Харьков, 2010. – 74р.
4. *Experimental investigation of wall and roof sandwich panels of "Aluterm" series* (Экспериментальное исследование стеновых и кровельных сэндвич-панелей серии «Алютерм»). / В.С. Шмуклер, Е.И. Лугченко, Е.А. Петрова. // Коммунальное хозяйство городов. – №118 (2014) – С. 11-20
5. Анализ характера деформирования и разрушения трехслойных стеновых панелей серии «Алютерм» / Е.А. Петрова. //Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Випуск 151 (2015) – С. 26-43.
6. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – Москва: 1967. – 987 с.
7. ГОСТ 23486-79. Панели металлические трехслойные стеновые с утеплителем из пенополиуретана. Технические условия. М: 1979. – 19 с.
8. ДСТУ Б.В.1.2-3:2006. Прогнбы и перемещения. Требования проектирования. Минстрой, Киев: 2006. 12 с.

References

1. *European Recommendations for Sandwich Panels (CIB 2000). Part 1: Design.* Rotterdam, 2000. – 168p.
2. Rzhnitsin A.R. Composite rods and plates. – Moscow, Stroyizdat:1986. – 136 p.
3. ТУ В.2.6-28.1-32564237-001:2007. Metal sandwich panels of the "AluTerm" series. Kharkov, 2010. – 74p.
4. *Experimental investigation of wall and roof sandwich panels of "Aluterm" series* (Экспериментальное исследование стеновых и кровельных сэндвич-панелей серии «Алютерм»). / В.С. Шмуклер, Е.И. Лугченко, Е.А. Петрова. // Коммунальное хозяйство городов. – №118 (2014) – С. 11-20
5. Analysis of the deformation and fracture of sandwich panels of "Aluterm" series / E.A. Petrova. //Collection of scientific papers of Ukrainian State Academy of Railway Transport. – Vol. 151 (2015) – p. 26-43.
6. Volmir A.S. The stability of deformable systems. – Moscow: 1967. – 987 p.
7. GOST 23486-79. The three-layer metal wall panels with insulation made of polyurethane foam. Technical conditions. M: 1979. – 19 p.
8. DSTU B.V.1.2-3:2006. Deflections and displacements. Design requirements. Ministry of Construction, Kiev: 2006. 12 p.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри будівельних конструкцій Шмуклер В.С., Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна.

Автор: ПЕТРОВА Олена Олександрівна
аспірант кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова.
E-mail – lenka_pestrushka@inbox.ru

Автор: КАЛМИКОВ Олег Олександрович
кандидат технічних наук, асистент кафедри
будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова.
E-mail – kalmikov88@mail.ru

ДО ОЦІНКИ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ ТРИШАРОВИХ СЕНДВІЧ-ПАНЕЛЕЙ

О.О. Петрова, О.О. Калмиков

У статті розглянуто експериментально-теоретичний підхід до визначення критичних навантажень за чотирма типами граничних станів тришарових сендвіч-панелей. Наведено алгоритми визначення критичних сил вичерпання несучої здатності сендвіч-панелі при рівномірно розподілених і зосереджених навантаженнях. Дана постановка і підхід до вирішення задачі раціоналізації параметрів сендвіч-панелей.

Ключові слова: сендвіч-панель, граничний стан, складкоутворення, втрата стійкості, пружна основа, коефіцієнт постілі.

TO THE ASSESSMENT OF THE LIMIT STATES OF SANDWICH PANELS

O.O. Petrova, O.O. Kalmykov

The experimentally-theoretical approach to the determination of the critical loads for the four types of limit states of sandwich panels is described in paper. The algorithms for the determination of the critical forces of exhaustion of bearing capacity of sandwich panels under the uniformly distributed and concentrated loads are shown. The formulation and approach for solving the problem of rationalizing of the parameters of sandwich panels are given. The results of calculation of critical loads for each type of limit states for panels with different thickness are shown. According to the given diagrams the rationalization of construction of sandwich panel in the way of alignment of critical loads for all types of limit states is proposed.

Keywords. sandwich panel, limit state, folding, buckling, Winkler foundation, modulus of subgrade reaction.